

FRACTAL COMMUNICATION SYSTEM USING DIGITAL SIGNAL PROCESSING STARTER KIT (DSK) TMS320C6713

Arsyad Ramadhan Darlis

Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri,
Institut Teknologi Nasional Bandung
Jl. PHH Mustapha No. 23 Bandung 40124
arsyad@itenas.ac.id

ABSTRACT

In 1992, Wornell and Oppenheim did research on a modulation which is formed by using wavelet theory. In some other studies, proved that this modulation can survive on a few channels and has reliability in some applications. Because of this modulation using the concept of fractal, then it is called as fractal modulation. Fractal modulation is formed by inserting information signal into fractal signals that are self-fractal similiary. This modulation technique has the potential to replace the OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), which is currently used on some of the latest telecommunication technologies. The purpose of this research is to implement the fractal communication system using Digital Signal Processing Starter Kit (DSK) TMS320C6713 without using AWGN and Rayleigh channel in order to obtain the ideal performance of the system. From the simulation results using MATLAB7.4. it appears that this communication system has good performance on some channels than any other communication systems. While in terms of implementation by using (DSK) via TMS320C6713 Code Composer Studio (CCS), it can be concluded that the fractal communication system has a better execution time on some tests.

Keywords: fractal modulation, self-similarity, dsk tms320c6713, wavelet

ABSTRAK

Pada tahun 1992, Wornell dan Oppenheim melakukan penelitian mengenai sebuah modulasi yang dibentuk dengan menggunakan teori wavelet. Pada beberapa penelitian yang lain, terbukti bahwa modulasi ini dapat bertahan pada beberapa kanal dan memiliki kehandalan pada beberapa aplikasi. Karena modulasi ini menggunakan konsep fraktal maka dinamakan modulasi fraktal. Modulasi fraktal dibentuk dengan cara menyisipkan sinyal informasi ke dalam sinyal fraktal yang bersifat self-similarity. Modulasi ini berpotensi dalam menggantikan teknik OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) yang saat ini digunakan pada beberapa teknologi telekomunikasi terkini. Tujuan penelitian ini adalah mengimplementasikan sistem komunikasi fraktal dengan menggunakan Digital Signal Processing Starter Kit (DS) TMS320C6713 tanpa melewatkannya pada kanal AWGN maupun Rayleigh agar didapatkan kinerja pada siste yang ideal. Dari hasil simulasi dengan menggunakan MATLAB 7.4., terlihat bahwa sistem komunikasi ini memiliki kinerja yang baik pada beberapa kanal dibandingkan sistem komunikasi yang lainnya. Sedangkan, dalam hal implementasi dengan menggunakan (DSK) TMS320C6713 melalui Code Composer Studio (CCS) dapat diambil kesimpulan bahwa sistem komunikasi fraktal ini memiliki waktu eksekusi yang lebih baik pada beberapa pengujian.

Kata kunci: modulasi fraktal, self-similarity, wavelet, dsktms320c6713

PENDAHULUAN

Pada tahun 1992, Wornell dan Oppenheim, menemukan sebuah modulasi yang dibentuk dengan menggunakan *wavelet* (Wornell & Oppenheim, 1992). Dengan menggunakan teknik *scale-diversity*, yang membuat sinyal informasi menjadi *multiple time-scale*, mereka membangkitkan sinyal fraktal yang menjadi dasar dari modulasi fraktal. Sinyal fraktal atau sinyal *bihomogeneous* memiliki sifat *self-similarity*, yang apabila dilakukan perubahan skala secara *dyadic*, maka sinyal tersebut akan memiliki bentuk yang serupa dengan sinyal sebelum dilakukan penyekalaan. Modulasi fraktal sendiri dibentuk dengan cara menyisipkan sinyal informasi ke dalam sinyal *bihomogeneous* tersebut. Kehandalan dari modulasi ini telah dibuktikan oleh penelitian-penelitian yang dilakukan setelahnya (Luigi, *et. al.*, 2010; Evangelista, 2006; Shiny, *et. al.*, 2015) baik dari sisi aplikasi maupun ketahanannya terhadap sebuah kanal.

Pada penelitian ini, modulasi fraktal akan ditransmisikan pada kanal Additive White Gaussian Noise (AWGN) dan kanal *Fading*. Sinyal hasil modulasi yang telah dipengaruhi kanal akan didemodulasi kembali sehingga akan didapat sinyal informasi semula. Proses tersebut akan dilakukan secara simulasi pada *software* MATLAB versi 7.4. Dari hasil simulasi tersebut akan dapat diamati performansi dari sistem komunikasi fraktal dibandingkan dengan sistem komunikasi lainnya. Setelah itu, sistem komunikasi fraktal akan diimplementasikan secara *real time*. Implementasi akan dilakukan dengan menggunakan Digital Signal Processing Starter Kit (DSK) jenis TMS320C6713. Akan tetapi dalam implementasi yang akan dilakukan tidak akan melewatkan sinyal hasil modulasi pada kanal apapun karena hanya menggunakan sebuah DSK saja.

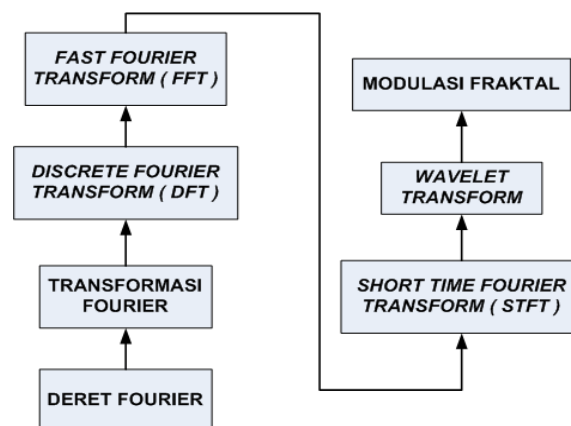
Penelitian ini memiliki beberapa tujuan yaitu diantaranya membuat simulasi sistem komunikasi fraktal menggunakan program MATLAB 7.4 pada kanal AWGN dan kanal *Fading*, serta mengimplementasikannya dengan menggunakan Digital Signal Processing Starter Kit (DSK) TMS320C6713 secara *real time*. Batasan masalah dari pokok bahasan penelitian ini adalah: (1) Kanal yang digunakan sebagai media transmisi dalam simulasi adalah kanal Additive White Gaussian Noise (AWGN) dan kanal *fading*. (2) Pada implementasi sistem komunikasi fraktal tidak menggunakan kanal apapun. (3) Sistem komunikasi yang digunakan sebagai pembanding adalah sistem komunikasi digital. (4) Implementasi sistem komunikasi fraktal hanya menggunakan sebuah Digital Signal Processing Starter Kit (DSK) jenis TMS320C6713. (5) Penelitian ini tidak membahas mengenai kanal yang digunakan pada simulasi karena dalam implementasi tidak menggunakan kanal apapun.

Berdasarkan teori transformasi Fourier diketahui bahwa sinyal dapat diekspresikan sebagai penjumlahan dari deretan sinus dan kosinus yang terbatas. Penjumlahan ini dikenal dengan nama deret Fourier (Fourier Expansion). Kerugian terbesar dari deret Fourier ini adalah hanya memiliki resolusi frekuensi dan tidak mempunyai resolusi waktu. Ini berarti bahwa walaupun kita dapat menunjukkan semua frekuensi yang ada pada suatu sinyal tetapi kita tidak mengetahui kapan sinyal itu terjadi. Untuk menyelesaikan masalah ini telah dikembangkan suatu teknik yang lebih atau mampu merepresentasikan sinyal dalam domain waktu dan frekuensi pada waktu yang sama.

Ide di balik representasi gabungan waktu-frekuensi ini adalah untuk memotong sinyal dimaksud menjadi beberapa bagian dan kemudian menganalisa bagiannya secara terpisah. Dengan menganalisa sebuah sinyal dengan cara seperti ini akan memberikan informasi tentang kapan dan dimana komponen perbedaan frekuensi. Untuk menyelesaikan masalah ini digunakanlah *wavelet*. *Wavelet* adalah suatu fungsi matematika yang membagi data menjadi beberapa komponen frekuensi yang berbeda-beda dan menganalisis setiap komponen tersebut dengan menggunakan resolusi yang sesuai dengan skalanya. *Wavelet* mempunyai keuntungan apabila dibandingkan dengan metode transformasi Fourier dalam hal menganalisis suatu sinyal yang tidak *stationer*.

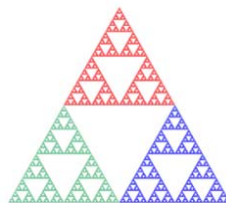
Sejarah mengenai *wavelet* belumlah lama. *Wavelet* baru ditemukan pada tahun 1980 oleh Haar, Morlet, Grossman, Meyer, Mallat, dan lainnya namun baru ditulis dalam bentuk *paper* oleh Ingrid Daubechies pada tahun 1988 yang memberikan perhatian besar pada dunia matematika. *Wavelet* digunakan sebagai analisis dalam pengolahan sinyal, analisis numerik, dan juga dalam model matematis. Hal ini membuatnya berkembang cepat sehingga melahirkan aplikasi-aplikasi *wavelet* yang baru seperti dalam kompresi data citra (Ghazel, *et. al.*, 2006; Cicek, 2015), optik (Kavehrad, *et. al.*, 2003), radar, prediksi gempa bumi, dan bahkan untuk memodulasi suatu sinyal. Sejarah mengenai perkembangan *wavelet* ditunjukkan pada Gambar 1.

Fraktal adalah benda geometris yang kasar pada segala skala, dan terlihat dapat "dibagi-bagi" dengan cara yang radikal. Beberapa fraktal bisa dipecah menjadi beberapa bagian yang semuanya mirip dengan fraktal aslinya. Fraktal dikatakan memiliki detail yang tak hingga dan dapat memiliki struktur serupa diri pada tingkat perbesaran yang berbeda. Pada banyak kasus, sebuah fraktal bisa dihasilkan dengan cara mengulang suatu pola, biasanya dalam proses rekursif atau iteratif.



Gambar 1 Sejarah Perkembangan Modulasi Fraktal

Geometri fraktal adalah cabang matematika yang mempelajari sifat-sifat dan perilaku fraktal. Fraktal bisa membantu menjelaskan banyak situasi yang sulit dideskripsikan menggunakan geometri klasik, dan sudah cukup banyak diaplikasikan dalam sains, teknologi, dan seni karya komputer. Gambar 2. menunjukan bentuk fraktal yang terkenal, suatu *fractal* bisa dipecah menjadi tiga segitiga Sierpinski



Gambar 2 Segitiga Sierpinski

Wornel & Oppenheim, (1992) mengusulkan sebuah teknik modulasi yang mengambil keuntungan dari sifat fraktal tersebut. Teknik ini disebut modulasi fraktal. Konsep modulasi fraktal didasarkan dari karakteristik dari sinyal *homogeneous* dan dalam implementasinya terkait dengan teori *wavelet*. Bit informasi dimodulasi dengan menggunakan basis yang memiliki sifat *self – similar*. Persamaan modulasi fraktal ditunjukkan pada Persamaan (1):

$$s(t) = \sum_n q[n] \sum_{m=0}^{M-1} \beta^{-\frac{m}{2}} \psi_{m,n}(t) \quad (1)$$

Sedangkan basis *wavelet* ditunjukkan pada Persamaan (2):

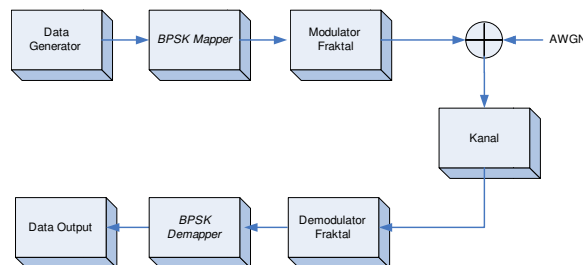
$$\psi_{m,n}(t) = 2^{m/2} \psi(2^m t - n) \quad (2)$$

Di mana $\psi_{m,n}(t)$ adalah skala dan translasi dari *mother wavelet*.

METODE

Desain Sistem Komunikasi Fraktal

Sistem komunikasi fraktal dimodelkan sebagai *transceiver* yaitu sesuai yang diberikan pada Gambar 3. Sistem ini terbagi atas dua blok yaitu blok *transmitter* dan blok *receiver*. Blok *transmitter* terdiri dari 3 proses yaitu pembangkitan data, BPSK *mapper*, dan proses rekonstruksi untuk modulator fraktal. Blok *transmitter* menerima inputan *data* dari proses BPSK *mapper* serta mengirimkan *data_kirim* kemudian melalui kanal dan diteruskan ke blok *receiver*. Komponen-komponen penyusun blok *receiver* merupakan *invers* atau kebalikan dari blok *transmitter*. Selanjutnya blok *receiver* memberikan keluaran *data output* sebagai perbandingan dengan data awal yang dibangkitkan untuk menghitung nilai *BER*.



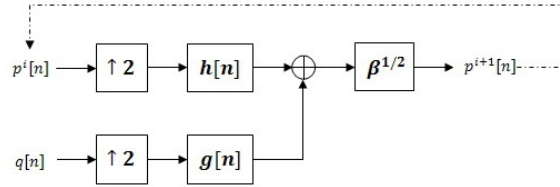
Gambar 3 Model Sistem Rekonstruksi dan Dekomposisi Sistem Komunikasi Fraktal

Proses diawali dengan pembangkitan data biner [0,1]. Setelah itu proses BPSK *mapper* memetakan data biner [0,1] menjadi data [-1,1]. Data ini kemudian diinputkan ke proses rekonstruksi yang akan diolah melalui *filter bank* yang disusun sedemikian rupa sehingga menghasilkan sinyal termodulasi fraktal. Output proses ini berupa data *real*.

Data output BPSK *mapper* selanjutnya disebut sebagai data *sequence* $q(n)$ atau koefisien *detail*, sedangkan $p(n)$ *sequence* atau koefisien aproksimasi diperoleh melalui suatu proses rekonstruksi data. Gambar 4. memperlihatkan modulator fraktal untuk rekonstruksi pembangkitan $p[n]$ *sequence* menggunakan *filter bank*.

Proses rekonstruksi terdiri dari *up sampling* data serta konvolusi dengan *low-pass filter* $h[n]$ dan *high-pass filter* $g[n]$ sesuai dengan algoritma *Inverse Fast Wavelet Transform* (IFWT).

Setelah itu data dikalikan dengan skala $\beta^{1/2}$, dimana nilai $\beta = 1$ dengan mensubstitusi nilai $H = -\frac{1}{2}$. Perhitungan koefisien aproksimasi pada proses rekonstruksi dapat dihitung melalui *Quadrature Mirror Filter* (QMF) yaitu pasangan *low-pass filter* $h[n]$ dan *high-pass filter* $g[n]$.



Gambar 4 Iterasi Proses Rekonstruksi Data Pada Modulator Fraktal
(Luigi, *et. al.*, 2010)

Estimasi untuk iterasi $p^{[i]}[n]$ diberikan pada Persamaan (3) dan (4) sebagai berikut:

$$p^{[0]}[n] = 0 \quad (3)$$

$$p^{[i+1]}[n] = \beta^{1/2} \{h[n - 2k]p^i[n] + g[n - 2k]q[n]\} \quad (4)$$

Apabila level rekonstruksi yang digunakan lebih dari satu maka proses akan di-iterasi sebanyak level yang ditentukan dengan menduplikasi data $q[n]$.

Rekonstruksi merupakan bagian yang paling penting dalam sistem komunikasi fraktal dimana data *sequence* $q[n]$ dimodulasi menggunakan sinyal *self-similar* pada suatu skala tertentu. Data $q[n]$ ditransformasikan dari domain frekuensi ke dalam domain waktu menjadi sinyal termodulasi *wavelet* $x(t)$ sesuai persamaan (5).

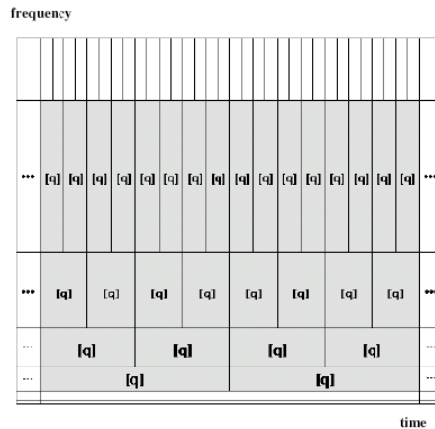
$$x(t) = \sum_n q[n \bmod L] \theta_n^H(t) \quad (5)$$

Di mana

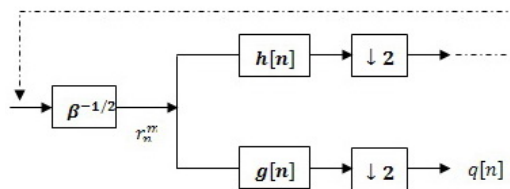
$$\theta_n^H(t) = \sum_m \beta^{-m/2} \psi_n^m(t) \quad (6)$$

Data $q[n]$ dinotasikan oleh vektor data $\hat{q} = [q[0], q[1] \dots q[L - 1]]$ dengan transmisi data untuk tiap blok seperti ditunjukkan Gambar 5.

Data yang sampai di penerima merupakan data terkirim setelah melewati kanal *multipath* dengan penambahan *noise AWGN*. Sehingga untuk memperoleh kembali koefisien aproksimasi dan koefisien detail maka dibutuhkan proses pembalikan atau dekomposisi seperti pada Gambar 6.



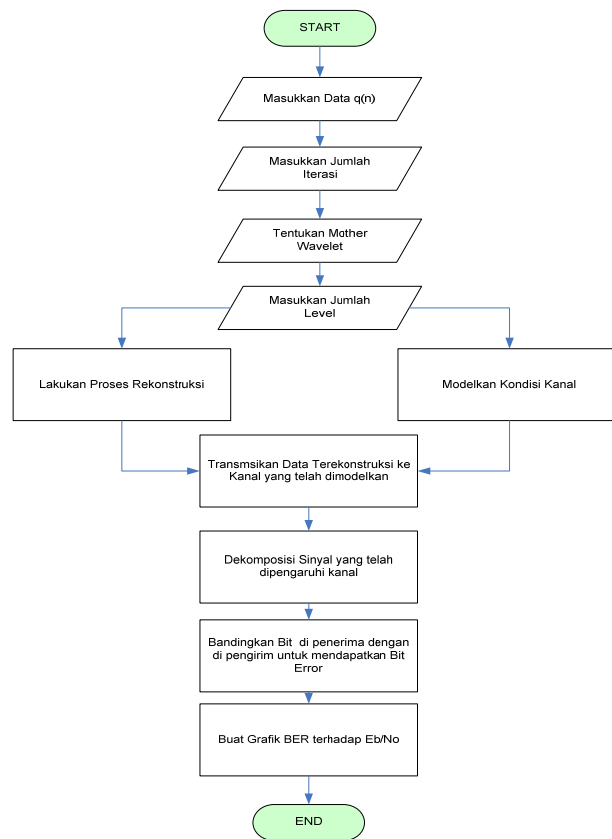
Gambar 5 Representasi Transmisi Modulasi Fraktal Untuk Vektor Data $q[n]$



Gambar 6 Demodulator Fraktal
(Luigi, *et. al.*, 2010)

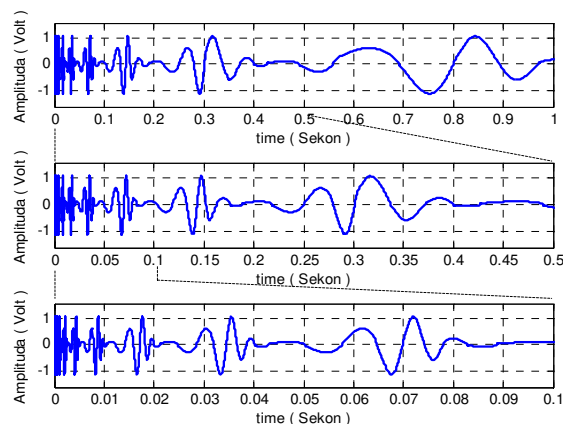
Komponen - komponen penyusun dekomposisi data yang diterima terdiri dari proses konvolusi dengan *low-pass filter* dan *high-pass filter*, *down sampling* data dan perkalian dengan faktor skala $\beta^{-1/2}$. Apabila level dekomposisi yang digunakan lebih dari satu maka proses melakukan iterasi sebanyak level yang ditentukan untuk mendapatkan nilai dari koefisien detail dan koefisien aproksimasi.

Simulasi sistem komunikasi fraktal dibuat berdasarkan *flowchart* pada Gambar 7:

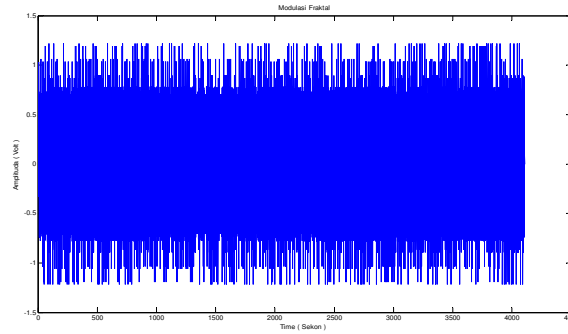


Gambar 7 Diagram Alir Simulasi Sistem Komunikasi Fraktal

Berdasarkan *flowchart* di atas, beberapa simulasi akan dibuat pada *software* MATLAB 7.4 untuk menguji kehandalan dari sistem komunikasi fraktal pada beberapa kanal dan kondisi. Seperti yang telah dibahas diatas, sinyal fraktal, dinyatakan dengan notasi $\theta_n^H(t)$, yang dibangkitkan oleh proses rekonstruksi memiliki sifat *self-similar*. Sifat *self-similar* yang dimiliki sinyal fraktal dapat terlihat ketika proses rekonstruksi dilakukan tanpa disisipi data $q[n]$. Gambar 8 menunjukkan bentuk data $q[n]$ yang telah termodulasi fraktal dengan jumlah data yang dikirim adalah 2^{11} yaitu 2048 data dengan jumlah level adalah 1 dan keluarga wavelet Daubechies 5.

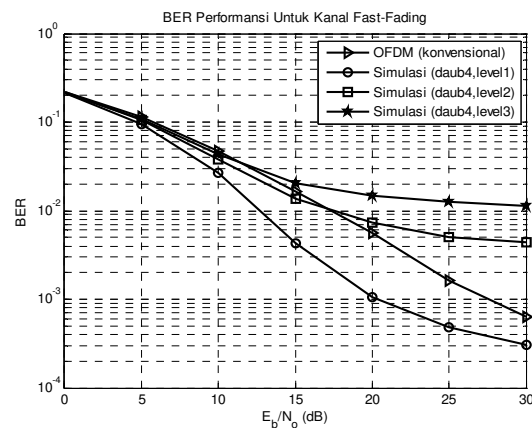


Gambar 8 Sinyal Fraktal Yang Bersifat *Self-Similar*



Gambar 9 Bentuk Data $q[n]$ yang Telah Termodulasi Fraktal

Pada Gambar 9 tersebut terlihat bahwa data data $q[n]$ memiliki bentuk yang mirip sekali dengan noise. Hal ini lah yang membuat modulasi fraktal *robustness* terhadap noise secara *real* maupun simulasi. Pada simulasi ini pula, kehandalan dari sistem komunikasi fraktal diuji dengan mentransmisikan pada beberapa kanal dan kondisi. Pada simulasi ini tidak dibahas terlalu mendalam mengenai hasil pengujian. Hal ini disebabkan penelitian ini lebih menekankan kepada implementasi daripada simulasi. Berikut salah satu hasil simulasi yang menunjukkan kehandalan dari sistem komunikasi *fractal* (Sumule, 2011).



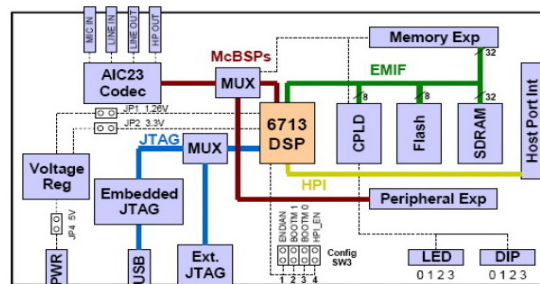
Gambar 10 Perbandingan Kinerja Sistem Komunikasi Fraktal pada Kanal *Fast Fading*

Dari hasil yang diperoleh, dapat disimpulkan apabila ditransmisikan pada kanal *fast fading*. Pada proses rekonstruksi dan dekomposisi level satu, akan didapatkan bahwa sistem komunikasi fractal lebih baik 7,5 dB dibandingkan dengan sistem OFDM pada BER 10^{-3} .

Implementasi Sistem Komunikasi Fraktal Menggunakan DSK TMS320C6713

Dalam implementasinya, digunakan sebuah *personal computer* (PC), dan sebuah DSK TMS320C6713 yang digunakan sebagai *transmitter* (rekonstruksi) dan *receiver* (dekomposisi) secara bersamaan. Kehandalan dari modulasi ini telah dibahas pada bab sebelumnya berdasarkan grafik BER terhadap E_b/N_o dengan mentransmisikan modulasi fraktal pada kanal AWGN dan beberapa kanal *Fading* dan diubah kembali menjadi sinyal informasi asli di *receiver*. Simulasi ini dilakukan dengan menggunakan *software* MATLAB 7.4. Sedangkan pada tahap implementasi ini, modulasi fraktal yang

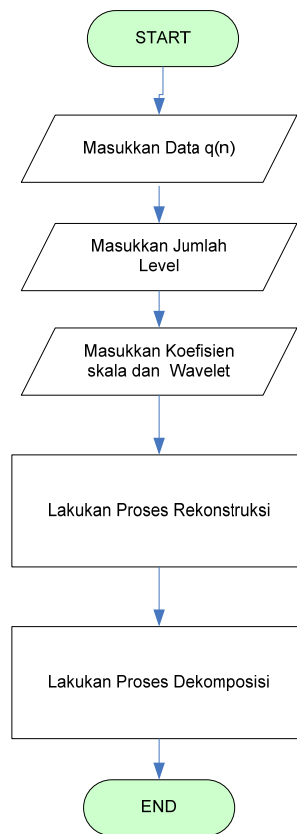
telah dibangkitkan tidak akan ditransmisikan dengan menggunakan model kanal apapun tetapi langsung masuk ke *receiver* untuk diubah kembali menjadi sinyal asal.



Gambar 11 Diagram Blok DSK TMS320C6713
(Halleyano, 2009)

DSK C6713 memiliki fitur-fitur *hardware*, sebagai berikut: DSP TMS320C6713 beroperasi pada frekuensi 255 MHz, codec stereo TLV320AIC23 disertai dengan *line in*, *line out*, *microphone*, dan *headphone*, SDRAM berukuran 16 Mbyte, memori Flash berukuran 512 Kbyte (256Kbyte yang dapat digunakan), 4 LED dan Dip Switch, emulasi JTAG melalui emulator JTAG *on-board* dengan *interface* USB, dan konektor ekspansi standar untuk penggunaan *daughter card*. Implementasi proses rekonstruksi dan dekomposisi pada DSK ini terdiri dari dua tahap, yaitu tahap inisialisasi *board* dan tahap rutin program. Pada aplikasi *source code* mengenai inisialisasi *board* ini disediakan oleh pihak *vendor* yaitu Texas Instrument, sedangkan rutin program dikompilasi pada CCS. Setelah dikompilasi, maka CCS akan menghasilkan *executable files* berupa COFF file berekstensi *out* yang dapat di-load ke *board* DSK. File ini berisi *compiled-assembly* dari program berbahasa C yang telah dibuat sebelumnya. (Gumilang, 2013; Ibrahim, 2009)

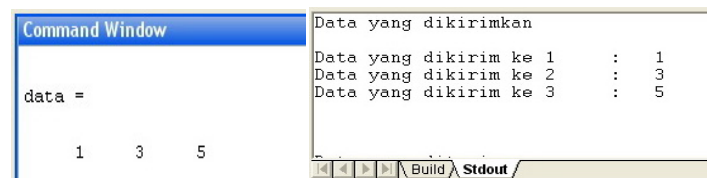
Sistem komunikasi ini diimplementasikan berdasarkan *flowchart* pada Gambar 12.



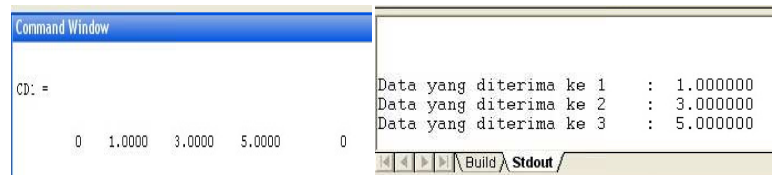
Gambar 12 *Flowchart* Implementasi Sistem Komunikasi Fraktal

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi baik yang dilakukan ditampilkan dan dievaluasi dengan menggunakan MATLAB 7.4. Maupun hasil simulasi yang dilakukan dengan menggunakan *Code Composer Studio* (CCS) pada setiap proses dari rekonstruksi dan dekomposisi sistem komunikasi fraktal. Pada penelitian ini akan dibahas mengenai pengujian pada level 1 saja, karena kinerja sistem komunikasi fraktal pada level 1 lebih baik dibandingkan dengan level-level yang lain, terutama pada kanal *fast fading* dan *slow fading*, seperti yang telah terbukti dari hasil simulasi yang terdapat pada bab III. Gambar 13 dan 14 menunjukkan hasil perbandingan simulasi pada MATLAB 7.4 dan CCS.



Gambar 13 Data Kirim Pada Proses Rekonstruksi



Gambar 14 Data Terima Pada Proses Dekomposisi

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari simulasi baik menggunakan MATLAB maupun Code Composer Studio (CCS) maka dapat disimpulkan bahwa hasil yang diperoleh dari kedua simulasi secara umum telah menunjukkan hasil yang diinginkan. Hal ini dapat ditunjukkan pada keluaran yang hampir sama pada kedua simulasi untuk setiap prosesnya.

Parameter implementasi yang akan menentukan kinerja dari sistem komunikasi ini adalah waktu eksekusi. Waktu eksekusi adalah waktu yang dibutuhkan sebuah data dapat diolah oleh sebuah proses dalam sebuah sistem. Dalam pemrograman DSP, waktu yang dibutuhkan untuk mengeksekusi fungsi ditunjukkan dalam besaran *clock* dengan satuan *cycle*. Frekuensi *clock* DSK TMS3206713 adalah 225 MHz. Hal ini memberikan periode *clock* sebesar:

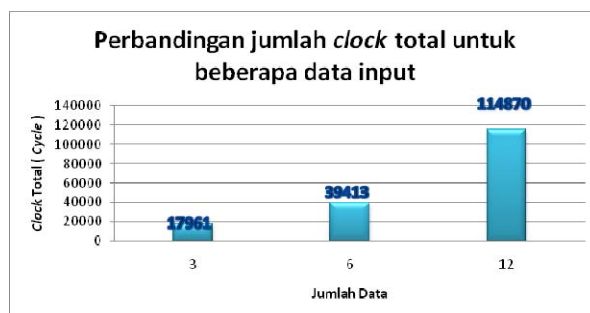
$$\frac{1}{225 \text{ MHz}} = 4,444 \text{ ns} \quad (6)$$

Jika nilai-nilai *clock* yang didapatkan pada setiap proses dikalikan dengan periode tersebut maka akan dihasilkan waktu eksekusi dari proses rekonstruksi dan dekomposisi yang diinginkan. Pada pengujian ini menggunakan beberapa skenario yang dapat menunjukkan kinerja sistem komunikasi ini secara *real time*. Tabel 2 menunjukkan setiap proses rekonstruksi dan dekomposisi sistem komunikasi fraktal.

Tabel 1 Proses Rekonstruksi dan Dekomposisi Sistem Komunikasi *Fractal*

No	Proses
1	Input
2	Upsampling Input Zeros
3	Upsampling Input Paket Data
4	Konvolusi dengan $h(n) = C A 1$
5	Konvolusi dengan $g(n) = C D 1$
6	Penjumlahan Koefisien Aproksimasi (CA1) dan Koefisien Detail (CD1)
7	Dekonvolusi input dekomposisi dengan $g(n)$
8	Downsampling hasil dekonvolusi

Evaluasi waktu eksekusi pada setiap proses rekonstruksi dan dekomposisi dengan menggunakan jumlah data *input* yang berbeda. Pada Gambar 15 terlihat bahwa dengan variasi input data yang meningkat akan menghasilkan jumlah *clock* total yang meningkat pula. Jumlah *clock* total ini merepresentasikan waktu eksekusi total dari sistem komunikasi fraktal. Dengan mengirimkan 3 buah data didapatkan jumlah clock 17961 atau waktu eksekusi 0,0798 ms, 6 buah data didapatkan jumlah clock 39413 atau waktu eksekusi 0,175 ms, dan 12 buah data didapatkan jumlah clock 114870 atau waktu eksekusi 0,51 ms. Perbedaan waktu eksekusi antara 3 buah data dan 12 buah data tidak terlalu jauh perbedaannya atau dapat disebut masih sangat singkat yaitu waktu eksekusi 3 buah data sekitar 15, 64 % dari waktu eksekusi 12 buah data atau sekitar 0,43 ms. Apabila dikirimkan lebih banyak data pun sistem komunikasi fraktal memiliki kehandalan dalam waktu eksekusi yang sangat singkat.



Gambar 15 Grafik Perbandingan Sistem Komunikasi Fraktal dengan Perubahan Jumlah *Input*

Evaluasi waktu eksekusi pada sistem komunikasi fractal dan sistem Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM). Pengujian simulasi dengan 3 buah *data input* dapat dilihat di Tabel 2, pengujian simulasi dengan 6 buah *data input* dapat dilihat di Tabel 3 dan pengujian simulasi dengan 12 buah *data input* dapat dilihat di Tabel 4. Dari hasil pengujian untuk sejumlah *data input*, dapat terlihat bahwa sistem komunikasi fraktal memiliki waktu eksekusi keseluruhan yang lebih singkat dibandingkan dengan sistem OFDM. Hal ini disebabkan kompleksitas dari proses rekonstruksi dan dekomposisi sistem komunikasi fraktal sangatlah rendah. Beda halnya dengan proses *transceiver* dari sistem OFDM yang lebih kompleks. Waktu eksekusi dari modulasi fraktal adalah kurang lebih 2,5 % dari waktu eksekusi dari sistem OFDM. Pada sistem OFDM, peningkatan waktu eksekusi sangat tinggi ketika input diproses pada *receiver*. Hal ini membuktikan kompleksitas pada *receiver* sangat tinggi.

Tabel 2 Waktu Eksekusi Sistem Komunikasi Fractal dan Sistem OFDM Dengan 3 Buah Data *Input*

Sisi	Proses	Clock (Cycle)	Waktu Eksekusi (milidetik)
Pengirim	Rekonstruksi sistem komunikasi fraktal	13985	0.062155556
	OFDM <i>Transmitter</i>	36359	0.161595556
Penerima	Dekomposisi sistem komunikasi fraktal	17961	0.079826667
	OFDM <i>Receiver</i>	774811	3.443604444

Tabel 3 Waktu Eksekusi Sistem Komunikasi Fraktaldan Sistem OFDM Dengan 6 Buah Data *Input*

Sisi	Proses	Clock (Cycle)	Waktu Eksekusi (milidetik)
Pengirim	Rekonstruksi sistem komunikasi fraktal	31036	0.137937778
	OFDM <i>Transmitter</i>	52876	0.235004444
Penerima	Dekomposisi sistem komunikasi fraktal	39413	0.175168889
	OFDM <i>Receiver</i>	1514807	6.732475556

Tabel 4 Waktu Eksekusi Sistem Komunikasi Fraktaldan Sistem OFDM Dengan 12 Buah Data *Input*

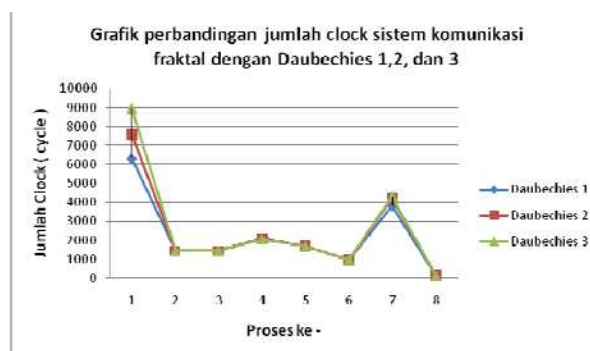
Sisi	Proses	Clock (Cycle)	Waktu Eksekusi (milidetik)
Pengirim	Rekonstruksi sistem komunikasi fraktal	98593	0.438191111
	OFDM <i>Transmitter</i>	127238	0.565502222
Penerima	Dekomposisi sistem komunikasi fraktal	114870	0.510533333
	OFDM <i>Receiver</i>	3000086	13.33371556

Evaluasi waktu eksekusi pada setiap proses rekonstruksi dan dekomposisi dengan menggunakan *mother wavelet* yang berbeda (Gambar 16). Dari hasil pengujian terdapat beberapa analisis sebagai berikut yaitu perbedaan penggunaan *mother wavelet* yang digunakan tidak begitu mempengaruhi waktu eksekusi sistem komunikasi fraktal. Hal ini terlihat bahwa perbedaan waktu eksekusi total dari hasil simulasi dengan Symlet 4 dan Daubechies 4 hanyalah sebesar 0,000769 ms atau 173 *cycles*. Perbedaan yang sangat kecil ini disebabkan perbedaan waktu eksekusi di proses *input* pada rekonstruksi dan dekonvolusi pada dekomposisi.



Gambar 16 Perbandingan Sistem Komunikasi Fractal dengan Daubechies 4 dan Symlet 4

Evaluasi waktu eksekusi pada setiap proses rekonstruksi dan dekomposisi dengan menggunakan *mother wavelet* yang sama akan tetapi berbeda jumlah koefisien (Gambar 17). Dari data pengujian, terlihat bahwa pengaruh perbedaan jumlah koefisien terhadap waktu eksekusi adalah semakin banyak koefisien skala dan *wavelet* maka jumlah *clock* atau waktu eksekusi akan semakin tinggi pula. Hal ini disebabkan proses penjumlahan dan perkalian yang terdapat pada proses rekonstruksi dan dekomposisi semakin banyak. Dari grafik tersebut pula menunjukkan bentuk yang tidak berubah untuk setiap pengujian. Hal ini berarti kenaikan jumlah koefisien setiap tingkat, yang dalam artian jumlah koefisien bertambah 2, mengakibatkan kenaikan waktu eksekusi total yang cenderung tetap yaitu sekitar 0,00711 ms atau 1600 *cycles*.



Gambar 17 Perbandingan Sistem Komunikasi Fractal Dengan Daubechies 1, 2 dan 3

SIMPULAN

Hasil simulasi setiap proses rekonstruksi dan dekomposisi sistem komunikasi fraktal yang telah direalisasikan di MATLAB memberikan hasil yang sama dengan hasil implementasi keluaran dari *Code Composer Studio* (CCS). Waktu eksekusi yang diperoleh dengan 3 data *input* dan 12 data *input* memiliki perbedaan waktu eksekusi sekitar 0,43 ms. Waktu eksekusi dari sistem komunikasi fraktal jauh lebih singkat yaitu sekitar 2,5 % dari waktu eksekusi sistem OFDM. Sistem komunikasi fraktal dengan menggunakan *mother wavelet* Daubechies 4 dan Symlet 4, menunjukkan waktu eksekusi yang tidak terlalu jauh berbeda yaitu 0,000769 ms atau 173 *cycles*. Peningkatan jumlah koefisien skala dan koefisien wavelet dengan jenis *mother wavelet* yang sama akan mengakibatkan peningkatan waktu eksekusi yang tetap yaitu sekitar 0,00711 ms atau 1600 *cycles*.

DAFTAR PUSTAKA

- Cicek, S. Ferikoglu, A. & Pehlivan, I. (2015). A chaotic communication system design with chaotic on-off keying (COOK) modulation method. *Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU) 23th*: 431-434.
- Evangelista, G. (2006). Fractal Modulation Effects. *Proceeding of the 9th International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-06)*, Montreal, Canada.
- Gumilang, H. (2013). *Implementasi Sistem OFDM untuk komunikasi simpleks menggunakan DSK TMS320C6713*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Ghazel, M., Freeman, G. H., & Vrscaj, E.R. (2006). Fractal-Wavelet Image Denoising Revisited. *IEEE Transactions on Image Processing*, 15(9).
- Halleyano, A. (2009). *Implementasi Sistem Multicarrier berbasis wavelet menggunakan DSK TMS320C6713*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Ibrahim, N. (2009). *Implementasi Algoritma Sinkronisasi untuk Sistem OFDM menggunakan DSK TMS320C6713*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Kavehrad, M., Hamzeh, B. (2003). *Beaming Bandwidth via Laser Communications*. The Pennsylvania State University, Department of Electrical Engineering, CICTR, University Park.
- Luigi A., Daniele D. G., & Maurizio M. (2010). Performance Analysis of Fractal Modulation Transmission Over Fast-Fading Wireless Channels. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 48(2): 103-110.
- Sumule, H. A. (2011). *Modulasi Fraktal pada Kanal Multipath Fading Rayleigh*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Shiny, G., Baiju, M. R. (2015). Fractal approach for a high resolution multilevel inverter. *Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES), 2015 IEEE International Conference*: 1-5.
- Wornell, G. W., Oppenheim, A. V. (1992). Wavelet-based representations for a class of self-similar signals with application to fractal modulation. *IEEE Transactions Information Theory*, 38: 785-800.